

Pendekatan Penjelmaan Anak-Gelombang untuk Penentuan Fasa Kritikal Gelombang Seismik daripada Gempa Ranau Mw 6.0 (Wavelet Transformation Approach for Determining the Critical Phase of Seismic Waves from the Ranau Mw 6.0 Earthquake)

Noor Sheena Herayani Harith^{a,b*}, Shahrum Abdullah^c & Nicole Myrel Juventinus^a

^aFaculty of Engineering, Universiti Malaysia Sabah, Jalan UMS, 88400 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia,

^bNatural Disaster Research Centre (NDRC), Universiti Malaysia Sabah, Jalan UMS,

88400 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia,

^cDepartment of Mechanical & Manufacturing Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia,

43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

*Corresponding author: sheena@ums.edu.my

Received 12 August 2025, Received in revised form 2 March 2026

Accepted 2 April 2026, Available online 30 August 2026

ABSTRAK

Kajian ini membentangkan analisis parametrik tenaga gelombang seismik bagi gempa bumi bermagnitud Mw 6.0 yang melanda Ranau, Sabah pada tahun 2015. Lima stesen seismik berjaya merekodkan kejadian ini dan stesen terdekat adalah di Kota Kinabalu, terletak sejauh 42.15 km dari pusat gempa. Isyarat seismik dari stesen ini menunjukkan pecutan maksimum 0.124038 m/s^2 . Pendekatan pemprosesan isyarat berdasarkan penjelmaan anak-gelombang digunakan untuk menganalisis isyarat dalam bentuk pecutan, halaju dan anjakan. Isyarat kemudiannya dibahagikan kepada tujuh segmen masa (20%–80%) dan dianalisis berdasarkan parameter data statistik. Hasil menunjukkan segmen awal 30% mengandungi tenaga tertinggi, dengan nilai maksimum pecutan dan halaju masing-masing 0.124038 m/s^2 dan 0.0507350522 m/s . Anjakan maksimum dicatat dalam segmen 40% dengan nilai 0.0050926746 m . Parameter statistik tertinggi pada segmen 30–40% menyokong kehadiran gelombang bertenaga tinggi. Di samping itu, diperhatikan bahawa pemalar anak-gelombang yang padat dalam segmen awal, membuktikan pelepasan tenaga utama berlaku secara pantas dan intensif, berpotensi membantu pengesanan awal gelombang-P. Segmen 40% pula menunjukkan pergerakan tanah berlarutan, menunjukkan kesan tertangguh gelombang utama. Kajian ini memberi pemahaman yang lebih mendalam terhadap dinamik gelombang seismik dan membantu mengenal pasti fasa kritikal yang berpotensi menyebabkan kerosakan struktur. Kajian ini memainkan peranan penting dalam menyumbang kepada pemahaman mendalam terhadap ciri-ciri dinamik gelombang seismik menerusi penyediaan data yang terperinci dan berstruktur.

Kata kunci: Gempa Ranau; isyarat seismik; anak-gelombang; segmentasi masa; anjakan

ABSTRACT

This study presents a parametric analysis of seismic wave energy from the Mw 6.0 earthquake that struck Ranau, Sabah in 2015. The event was recorded by five seismic stations, with the nearest station in Kota Kinabalu, located 42.15 km from the epicentre. Seismic signals from this station recorded a peak ground acceleration of 0.124038 m/s^2 . The wavelet transform signal processing approach was employed to analyse the time series signals in terms of acceleration, velocity and displacement. The signals were divided into seven segments (20%–80%) and analysed using the data from statistical parameters. Results reveal that the initial 30% segment contains the highest energy, with maximum acceleration and velocity values of 0.124038 m/s^2 and 0.0507350522 m/s , respectively. The highest displacement value of 0.0050926746 m .

m was observed in the 40% segment. The statistical parameters peaked in the 30–40% segment, indicating the presence of high energy waves. It has been shown that a dense distribution of the wavelet coefficients in the early segment, indicating a rapid and intense energy release, consistent with potential early P-wave detection. Meanwhile, the 40% segment reflects prolonged ground movement, suggesting delayed effects of the main wave. This study offers valuable insights into the dynamic behaviour of seismic waves and aids in identifying critical phases that pose higher risks to structural integrity. This study significantly contributes to the in-depth understanding of seismic wave dynamics by providing structured and comprehensive data.

Keywords: Ranau earthquake; seismic signal; wavelet; time segmentation; displacement

PENGENALAN

Pergerakan kerak bumi berlaku secara berterusan disebabkan oleh putaran bumi pada paksinya yang boleh mewujudkan isu berkaitan dengan keseimbangan dinamik. Sekiranya daya yang terbina melebihi kekuatan struktur sesar, tenaga yang tinggi dilepaskan dalam bentuk pergeseran yang mendadak, lalu menghasilkan gegaran yang boleh dirasakan di sekitar kawasan (Haddow et al. 2020). Fenomena ini dikenali sebagai gempa bumi, dan kesannya boleh menghasilkan gelombang seismik yang berkeupayaan merosakkan struktur buatan manusia, terutamanya jika struktur tersebut tidak direka bentuk dengan mengambil kira keperluan seismik. Pada tahun 2015, Malaysia dikejutkan dengan kejadian gempa bumi bermagnitud Mw 6.0 yang berlaku di Ranau, Sabah yang berada di koordinat 6.0474° N, 116.5900° E pada kedalaman 11 km. Kejadian ini telah menyebabkan kerosakan kepada pelbagai struktur binaan (Mohamad et al. 2019) dan menghasilkan lebih daripada 80 gempa susulan. Gempa susulan ini dikenal pasti melalui penapisan berdasarkan kriteria masa dan ruang (Li et al. 2024) dan kebanyakannya tertumpu di sekitar pusat gempa dengan julat latitud antara 5.8°N hingga 6.2°N dan longitud antara 116.4°E hingga 116.7°E. Magnitud gempa susulan tersebut berada dalam lingkungan 1.0 hingga 4.7 dengan kedalaman 10–20 km, mencerminkan pelarasan pergerakan kerak bumi sepanjang garisan sesar.

Ketika kejadian, terdapat lima stesen seismik yang berjaya merekodkan gempa tersebut. Stesen seismik yang terdekat, iaitu KKM, berada pada jarak 42.15 km dari pusat gempa. KKM merupakan nama kod bagi stesen tersebut kerana terletak di daerah Kota Kinabalu. Jadual 1 memperincikan maklumat tentang stesen-stesen seismik yang terlibat, termasuk koordinat, jenis tapak asas stesen dibina, kelas tapak menurut National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP 2020), jarak dari pusat gempa, dan nilai pecutan yang dicatatkan. Untuk kod stesen SPM, KDM, LDM dan TSM, kod diberikan berdasarkan tempat pemasangannya iaitu masing-masing berada di daerah Sapulut, Kudat, Lahad Datu dan Tawau. Kajian ini menumpukan kepada analisis gelombang seismik daripada stesen KKM dengan menggunakan kaedah pemprosesan

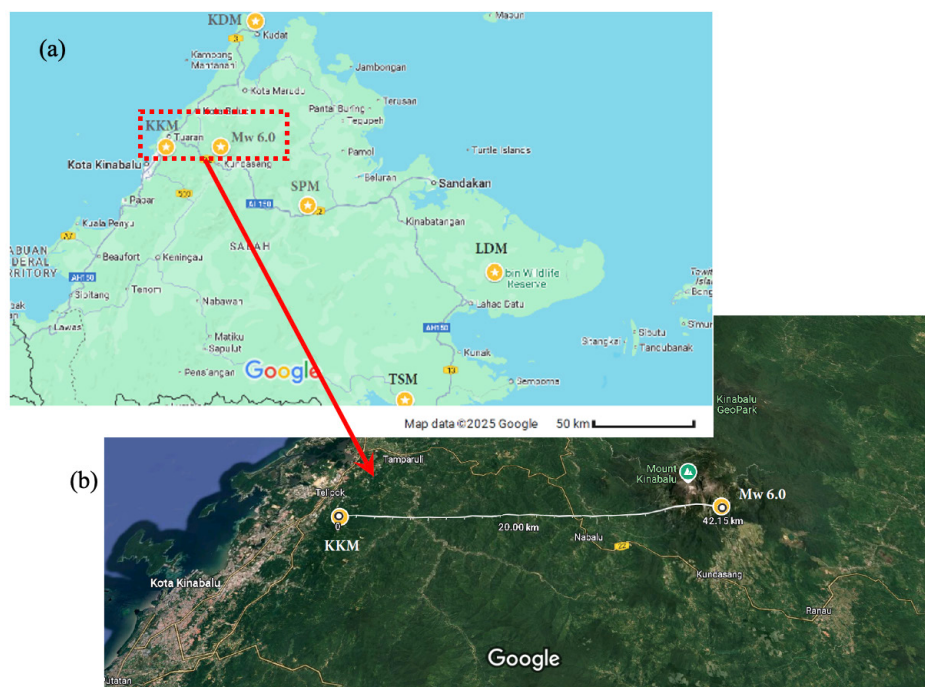
isyarat, khususnya pemjelmaan anak-gelombang untuk mengenal pasti ciri-ciri gelombang. Kajian seperti ini sangat membantu terutamanya mengekstrak ciri-ciri khas gelombang seismik seperti kajian dilakukan oleh Mousavi dan Beroza (2023), Yin et al. (2022) dan Li et al. (2018). Gelombang seismik turut memainkan peranan penting dalam mengenal pasti punca keretakan dalam struktur konkrit, sebagaimana yang dibuktikan dalam kajian oleh Senin et al. (2024) dan Al-Hababi et al. (2023). Kajian berkaitan penentu awal gempa bumi juga telah dijalankan bagi tujuan mengesan kejadian gempa sebelum ia berlaku, seperti yang dilaporkan oleh Zulhamidi et al. (2023). Menurut kajian tersebut, aktiviti gelombang seismik dalam siri isyarat masa gempa bumi dapat menunjukkan kemunculan gelombang awal sebelum gempa bumi berlaku.

Rajah 1 menunjukkan kedudukan stesen KKM yang paling hampir dengan pusat gempa, menjelaskan kenapa ia mencatatkan nilai pecutan tertinggi. Manakala Jadual 1 memaparkan maklumat lokasi stesen seismik yang terlibat dalam merekodkan gempa bumi. Kelas tapak NEHRP (2020) dan tapak asas stesen dibina turut ditunjukkan bagi menggambarkan variasi keadaan tanah yang mempengaruhi penghantaran gelombang. Kajian ini penting untuk penyediaan maklumat kuantitatif terhadap kekuatan gelombang pada peringkat awal gempa. Kemudian, ia adalah asas untuk perbandingan dengan parameter lain dan menunjukkan keupayaan penggunaan isyarat ini dalam sistem pengesanan awal (Li et al. 2018) serta dalam reka bentuk struktur berdaya tahan seismik. Hal ini kerana terdapat banyak kejadian kerosakan struktur yang telah dilaporkan di kawasan ini seperti yang dinyatakan oleh Mohamad et al. (2019). Menjadi satu cabaran besar apabila kebanyakan struktur yang terjejas merupakan jenis aras lemah serta terletak berhampiran berdekatan pusat gempa (Teddy dan Hardiman, 2018). Aras lemah merujuk kepada tingkat bawah dalam sesebuah bangunan bertingkat yang mempunyai kekuatan menentang gegaran sisi yang jauh lebih rendah berbanding tingkat-tingkat di atasnya. Keadaan ini menyebabkan tingkat tersebut lebih mudah mengalami ubah bentuk atau keruntuhan apabila berlaku gempa bumi.

Dalam usaha untuk menganalisis ciri-ciri gelombang

yang kompleks, kajian ini mengaplikasikan pendekatan pemprosesan isyarat, khususnya melalui teknik penjelmaan anak-gelombang berterusan (continuous wavelet transform – CWT). Kaedah ini telah terbukti berkesan dalam beberapa kajian terdahulu seperti yang dijelaskan oleh Justice et al. (2024), Yan (2024), Surucu et al. (2023) dan Abbas et al. (2023). Kaedah ini juga dapat mengesan kejadian anomali dengan lebih berkesan seperti yang dikaji oleh Usmani et al. (2024). Kaedah pemprosesan isyarat tradisional sering kali kurang efektif dalam mengenalpasti isyarat berfrekuensi tinggi dan beramplitud rendah yang lazimnya mengandungi maklumat bawah permukaan yang

ketara (Yılmaz and Akıllı 2025). Keadaan ini menjadi lebih mencabar apabila isyarat tersebut terganggu oleh bunyi latar atau menunjukkan sifat tidak pegun dan dinamik, yang menyukarkan penafsiran menggunakan kaedah lazim berasaskan Fourier (Jiang et al. 2024). Sehubungan itu, pendekatan berasaskan anak-gelombang dan algoritma pembelajaran mesin menawarkan keupayaan yang lebih tinggi dari segi ketepatan dan kecekapan dalam pemprosesan isyarat digital (Kubo et al. 2024) terutamanya bagi tujuan aruhan frekuensi tinggi (Abdiakhmetova dan Temirbekova 2025).



RAJAH 1. Peta Sabah yang menunjukkan (a) kedudukan kelima-lima zon seismik dan (b) stesen seismik KKM yang terletak sejauh 42.15 km dari pusat gempa bermagnitud Mw 6.0

JADUAL 1. Stesen gempa bumi dipasang pada tahun 2005 yang merekodkan gempa bumi Ranau 2015 magnitud 6.0

Kod Stesen*	Nama Daerah	Koordinat	Tapak asas stesen	Kelas tanah (NEHRP, 2020)	Jarak dari pusat gempa (km)	Pecutan (m/s^2)
KKM	Kota Kinabalu	6.0443 N, 116.2146 E	Batu pasir	C	42.15	0.124038
SPM	Sapulut	5.6409 N, 117.1950 E	Batu pasir	C	80.84	0.004700
KDM	Kudat	6.9167 N, 116.8333 E	Granit	B	101.80	0.003347
LDM	Lahad Datu	5.1777 N, 118.4980 E	Batu pasir	C	233.01	0.000426
TSM	Tawau	4.2936 N, 117.8725 E	Granit	B	247.20	0.000350

*kod stesen seperti KKM, SPM, KDM, LDM dan TSM diberikan berdasarkan tempat pemasangannya iaitu masing-masing berada di daerah Kota Kinabalu, Sapulut, Kudat, Lahad Datu dan Tawau

Oleh itu, kajian ini memfokuskan kepada gelombang seismik yang direkodkan oleh stesen KKM yang terletak paling hampir dengan pusat gempa. Skop kajian melibatkan analisis terperinci terhadap siri isyarat masa yang telah dibahagi kepada beberapa segmen masa. Hal ini adalah untuk mengenal pasti fasa kritikal gelombang seismik yang mempunyai potensi tertinggi terhadap kerosakan struktur. Kaedah analisis merangkumi penggunaan data statistik dan penjelmaan anak-gelombang berterusan (CWT) bagi mengenal pasti taburan tenaga dan ciri frekuensi bagi setiap segmen. Jangkaan hasil daripada kajian ini adalah penemuan segmen masa yang paling dominan dari aspek pecutan, halaju, dan anjakan, yang boleh digunakan sebagai asas kepada sistem pengesanan awal gempa atau penilaian bahaya seismik di kawasan berisiko. Kajian ini adalah penting untuk menyediakan gambaran terperinci mengenai kelakuan gelombang seismik dalam konteks dinamik tanah. Dengan hal yang demikian maka kajian ini dapat menyumbang kepada pemahaman saintifik mengenai risiko gempa bumi serta memberi manfaat kepada jurutera dan pembuat dasar dalam merangka pendekatan perlindungan struktur dan mitigasi bencana dengan lebih berkesan.

METODOLOGI

Carta alir bagi kajian ini ditunjukkan dalam Rajah 2 di mana terdapat tiga langkah yang utama iaitu pra-pemprosesan, analisis statistik dan pemprosesan isyarat. Untuk langkah pertama iaitu pra-pemprosesan, terdapat lima stesen seismik yang merekodkan gempa Mw 6 di Ranau 2015 yang terdiri daripada KKM, SPM, KDM, LDM dan TSM. Namun, kajian ini hanya memfokuskan kepada nilai pecutan, halaju dan anjakan yang tertinggi, maka hanya rekod siri isyarat masa dari stesen KKM akan dianalisis dengan lebih mendalam. Kemudian, daripada siri isyarat masa ini, analisis statistik dikira berdasarkan punca min kuasa dua (*Root-mean-square*, RMS), sisihan piawai, nilai purata, kurtosis, dan pencongan bagi setiap potongan siri isyarat masa dengan peratusan dari 20 hingga 80%. Akhir sekali, Pemprosesan isyarat diaplikasikan bagi melihat dengan lebih teliti pada bahagian potongan peratusan yang menghasilkan nilai amplitud yang signifikan.

PRA-PEMROSESAN

Gelombang primer atau ringkasnya dikenali sebagai Gelombang P merupakan jenis gelombang seismik tercepat yang dihasilkan semasa pergerakan patahan bumi. Gelombang ini boleh bergerak menembusi bahan pepejal, cecair dan gas pada arah getaran selari dengan arah

perambatan gelombang. Gelombang ini merupakan gelombang yang pertama dicatatkan oleh stesen seismik semasa kejadian gempa bumi dan memberikan maklumat penting mengenai masa ketibaan awal dan lokasi pusat gempa. Rajah 3 – 5 merupakan siri isyarat masa yang masing-masing menunjukkan gelombang daripada pecutan, kelajuan dan anjakan. Ketiga-tiga rajah ini memberikan gambaran lengkap tentang bentuk dan intensiti gelombang semasa gempa. Untuk siri isyarat masa dalam Rajah 3, Gelombang P telah dikesan pada 17.54 s sebelum gempa utama. Pada saat ini, nilai pecutan yang diperolehi adalah setinggi, 0.064406 m/s^2 . Gelombang P yang muncul terlebih dahulu sebelum gelombang utama menunjukkan tenaga awal yang dilepaskan. Puncak pecutan maksimum direkodkan pada 17.74 s, iaitu 0.124038 m/s^2 . Nilai ini menunjukkan kemuncak tenaga yang dilepaskan oleh gempa bumi dan menyebabkan kerosakan struktur yang ketara, terutamanya bagi struktur yang tidak tahan gempa. Corak isyarat menunjukkan pergerakan frekuensi tinggi dan rendah yang berulang, dan ia berkaitan dengan ciri-ciri kompleks sumber gelombang serta jenis tanah di lokasi pengukuran. Selepas keadaan puncak dicapai, amplitud isyarat menurun secara berperingkat, menunjukkan proses redaman semulajadi oleh tanah persekitaran.

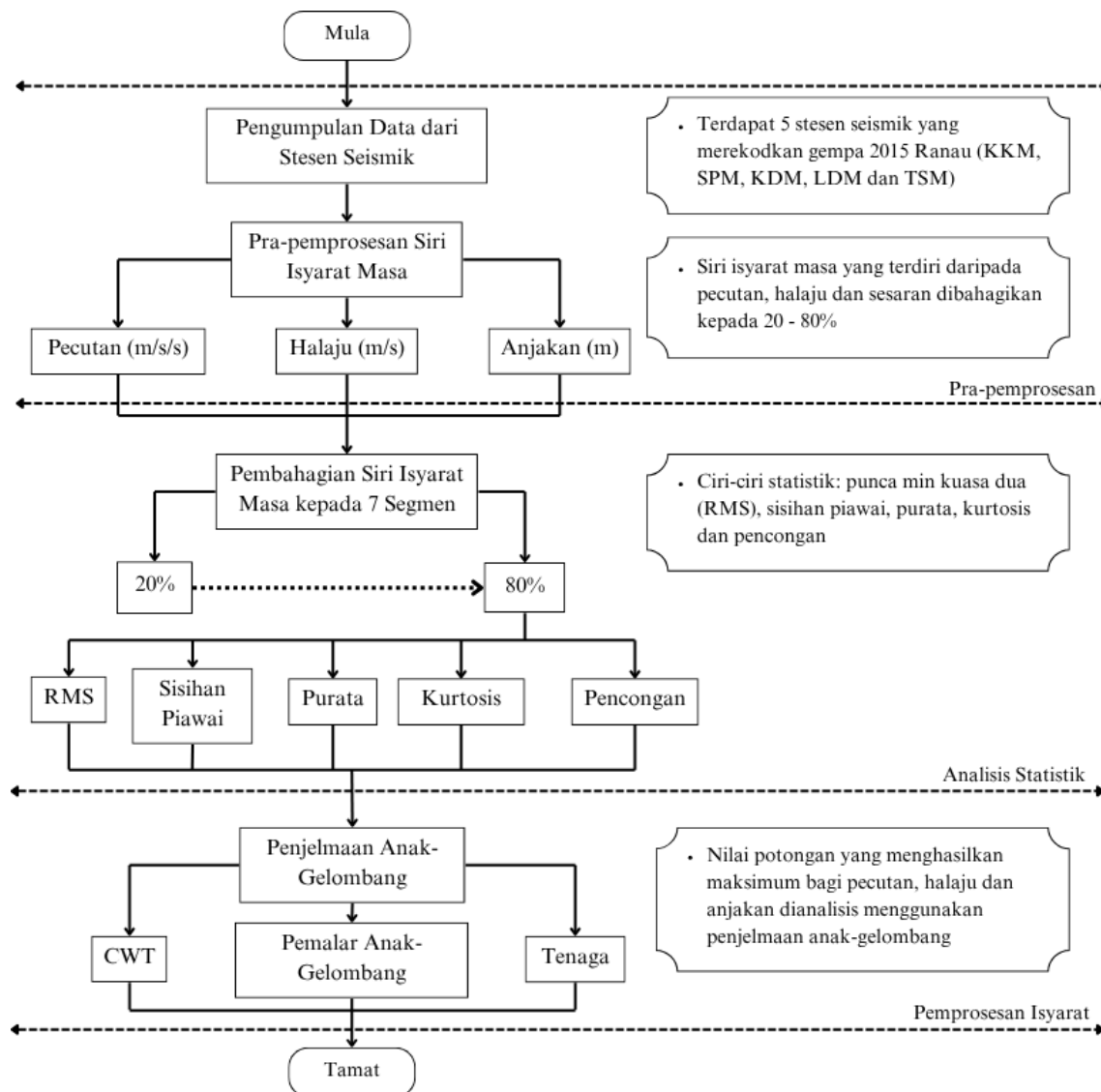
Rajah 4 menunjukkan graf siri isyarat masa halaju diperolehi melalui integrasi daripada data pecutan seismik. Isyarat ini bertujuan memahami sejauh mana dan seberapa cepat tanah bergetar akibat gelombang gempa. Nilai halaju maksimum yang dicatatkan ialah 0.0507350522 m/s , yang berlaku pada 19.88 s. Peningkatan halaju ini menunjukkan bahawa pada masa tersebut berlaku pergerakan tanah yang paling cepat dan berintensiti tinggi. Dinamik isyarat halaju mempunyai puncak tunggal yang menonjol dengan beberapa ayunan kecil selepasnya, yang menunjukkan fasa redaman apabila tenaga gelombang meresap ke dalam struktur geologi dan tanah tempatan.

Rajah 5 menggambarkan profil anjakan yang diperolehi daripada integrasi kedua terhadap isyarat pecutan. Anjakan merujuk kepada sejauh mana permukaan bumi telah beralih dari kedudukan asalnya akibat pengaruh gelombang seismik. Parameter ini penting dalam menilai kesan kumulatif gelombang terhadap kestabilan struktur dan geoteknikal. Nilai maksimum anjakan yang direkodkan ialah 5.09 mm. Walaupun ia kecil dari segi ukuran, nilai ini memberi gambaran tentang peralihan sebenar tanah yang boleh mengakibatkan retakan mikro pada sesaran (Torabi et al. 2020; Mayolle et al. 2023). Isyarat anjakan menunjukkan perubahan secara perlahan berbanding isyarat pecutan atau halaju. Ini kerana integrasi berganda menyebabkan isyarat menjadi lebih lengkung dan menonjolkan pergerakan lambat yang berpanjangan. Masa anjakan maksimum berlaku selepas nilai pecutan dan halaju maksimum, iaitu pada 23.85 s. Ini menggambarkan bahawa

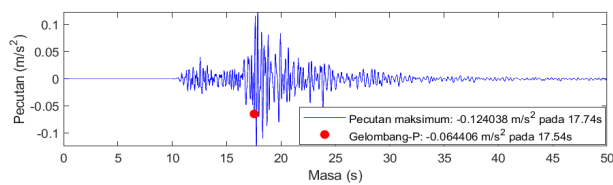
walaupun tenaga utama dilepaskan lebih awal, kesan fizikalnya terhadap anjakan tanah dapat berlarutan. Anjakan ini penting bagi menilai kecenderungan tanah untuk pergerakan kekal yang kritikal dalam rekabentuk geoteknikal, menyokong kajian pencecairan, tanah runtuh, atau perubahan topografi akibat gempa bumi dan memberikan input kepada model simulasi struktur tanah.

Rajah 6-8 memaparkan graf-graf siri isyarat pecutan, halaju dan anjakan bagi setiap segmen masa yang telah dibahagikan secara berturutan dari isyarat penuh gempa bumi yang direkodkan. Tujuannya adalah untuk menilai bagaimana intensiti dan corak getaran tanah berubah secara progresif dari awal hingga ke akhir kejadian gempa. Isyarat asal dibahagikan kepada tujuh bahagian mengikut peratusan panjang masa iaitu 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80%. Bagi setiap segmen, graf pecutan (Rajah 6) ditunjukkan secara berasingan, membolehkan

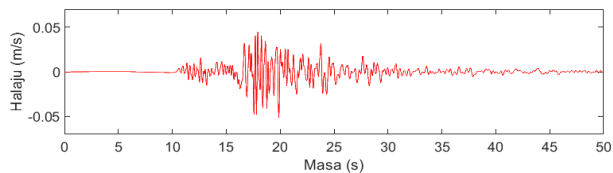
perbandingan bentuk dan intensiti gelombang antara satu sama lain. Corak yang konsisten menunjukkan nilai tinggi pada awal segmen dan semakin menurun. Segmen 30% menunjukkan puncak amplitud paling tinggi menandakan keamatan gelombang dan pelepasan tenaga terbesar berlaku dalam tempoh ini. Segmen 20% dan 40% juga menunjukkan corak gelombang dengan amplitud sederhana tinggi, mencerminkan sambungan fasa gelombang awal dan pertengahan yang masih kuat. Segmen 50% hingga 80% memperlihatkan penurunan ketara dalam amplitud dan kekompleksan bentuk gelombang, menunjukkan fasa redaman atau penghujung kejadian gempa di mana tenaga sudah mulai hilang. Bentuk gelombang dalam segmen akhir juga menjadi kurang tajam dan lebih lengkung. Rajah ini penting dalam mengasingkan fasa tenaga tinggi dan membolehkan fokus diletakkan kepada segmen kritikal.



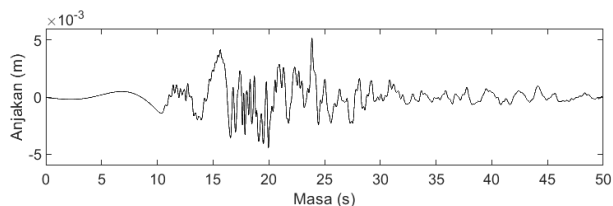
RAJAH 2. Carta alir metodologi kajian



RAJAH 3. Siri isyarat masa pecutan dengan nilai maksimum 0.124038 m/s² pada 17.74s dan gelombang-P dikesan pada 17.54s



RAJAH 4. Siri isyarat masa kelajuan dengan nilai maksimum -0.0507350522 m/s pada 19.88s

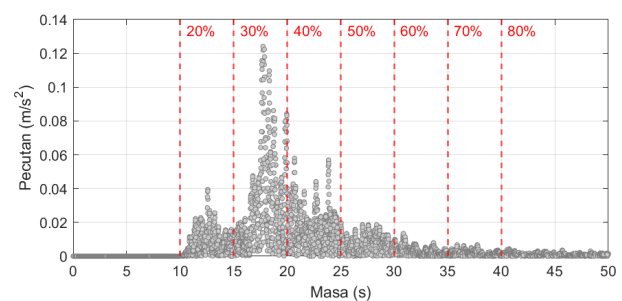


RAJAH 5. Isyarat masa bagi anjakan dengan nilai maksimum 0.0050926746 m pada 23.85s

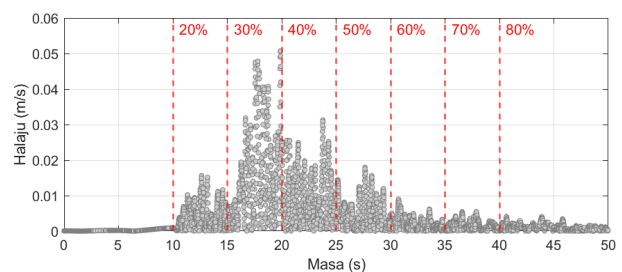
Untuk siri isyarat masa halaju (Rajah 7), segmen 30% sekali lagi menunjukkan nilai amplitud tertinggi bagi halaju, 0.0507350522 m/s, ini memperkukuh kenyataan bahawa tenaga kinetik tertinggi tertumpu di awal kejadian. Segmen 40% dan 50% mengekalkan bentuk gelombang yang masih aktif tetapi dengan amplitud yang lebih rendah. Dalam segmen 60% hingga 80%, amplitud gelombang berkurang secara signifikan dan bentuknya menjadi lebih sederhana serta kurang kompleks, menunjukkan fasa peleraian gelombang. Halaju menunjukkan secara jelas bagaimana tenaga dinamik berkurang secara berperingkat, iaitu bermula dengan tenaga tinggi pada peringkat awal gempa dan seterusnya beralih kepada fasa yang lebih stabil apabila gegaran semakin reda.

Segmen 40% menunjukkan nilai anjakan tertinggi sebanyak 0.0050927 m (Rajah 8) berbeza sedikit daripada pecutan dan halaju yang mencapai nilai maksimum lebih awal iaitu pada segmen 30%. Segmen 30% dan 50% juga menunjukkan anjakan yang ketara, walaupun sedikit lebih rendah berbanding segmen 40%. Ini menandakan bahawa peralihan tanah yang ketara berlaku bukan serta-merta

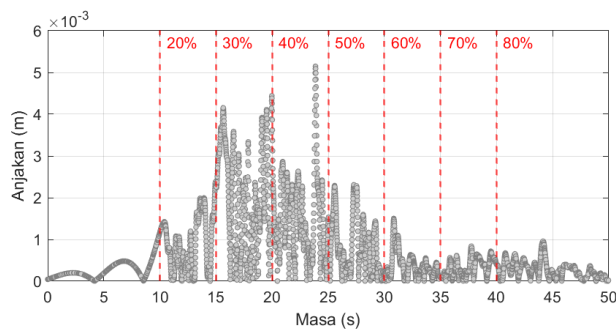
selepas pelepasan tenaga utama, tetapi melalui kesan terkumpul. Dalam segmen 60% ke atas, anjakan semakin berkurang dan cenderung menjadi stabil. Ini menunjukkan bahawa anjakan utama telah pun berlaku, dan hanya sedikit pergerakan sesar direkodkan. Bagi pecutan, segmen 30% menunjukkan RMS dan sisihan piawai tertinggi (0.03520 m/s²), dengan kurtosis tinggi (4.99), menandakan tenaga tinggi tertumpu pada permulaan gelombang. Selepas 50%, nilai statistik menurun secara drastik, menunjukkan tenaga telah berkurangan dan gelombang mula reda akibat pecutan ini. Pencongan pecutan pula berada hampir pada sifar di segmen pertengahan, menandakan bentuk gelombang seimbang. Bagi halaju, nilai RMS tertinggi pada 30% (0.01739 m/s), dengan kurtosis, 3.49 yang menunjukkan gelombang berintensiti sederhana dan kurang tajam berbanding pecutan. Segmen 50% mempunyai kurtosis tertinggi (5.60), yang mencadangkan terdapat sub-puncak dalam gelombang halaju. Merujuk kepada anjakan, nilai kurtosis tertinggi (4.01) direkodkan dalam segmen 40%. Nilai RMS tertinggi pada 30% dan 40%, menunjukkan anjakan berpanjangan berlaku sedikit lewat berbanding kemuncak pecutan. Hal ini membuktikan bahawa tenaga tertinggi dan puncak intensiti gelombang berlaku dalam segmen 20% hingga 40% pertama bagi kesemua parameter.



RAJAH 6 Pecutan dalam unit m/s² yang dianalisis pada potongan isyarat masa sebanyak 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% dan 80%



RAJAH 7. Halaju dalam unit m/s yang dianalisis pada potongan isyarat masa sebanyak 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% dan 80%



RAJAH 8. Anjakan dalam unit meter yang dianalisis pada potongan isyarat masa sebanyak 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% dan 80%

ANALISIS STATISTIK

Jadual 2 memaparkan hasil analisis statistik ke atas tiga parameter utama isyarat seismik bagi pecutan, halaju dan anjakan. Siri isyarat masa yang telah dibahagikan kepada

tujuh segmen mengikut peratusan masa di mana bagi setiap bahagian ciri-ciri statistik seperti purata, sisihan piawai, RMS, kurtosis dan pencongan dikira. RMS menggambarkan kekuatan purata tenaga gelombang, sisihan piawai menunjukkan kepelbagaian sebaran nilai daripada purata, purata merupakan nilai purata parameter seismik, kurtosis adalah untuk mengukur elemen puncak gelombang di mana nilai tinggi menunjukkan intensiti tinggi dan pencongan menunjukkan ketidaksimetrian bentuk gelombang.

Rajah 9 menunjukkan tiga carta radar berasingan yang masing-masing mewakili pecutan, halaju dan anjakan. Setiap plot memaparkan enam nilai statistik utama untuk setiap segmen masa (%) merangkumi purata, sisihan piawai, RMS, kurtosis dan pencongan. Semua nilai statistik telah dinormalkan bagi membolehkan perbandingan yang seimbang dan adil antara pelbagai segmen dan parameter. Penormalan dilakukan bagi memastikan setiap parameter berada dalam skala yang seragam, sekali gus mengelakkan dominasi satu unit pengukuran ke atas yang lain dan membolehkan pola pengamatan dikenalpasti dengan lebih jelas (Kern et al. 2020).

JADUAL 2. Nilai statistik bagi parameter pecutan, halaju dan anjakan dalam segmen 20% hingga 80% siri isyarat masa

Peratusan Segmen Siri Isyarat Masa		20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
Pecutan (m/s ²)	Purata	-0.00005	0.00019	0.00021	-0.00011	-0.00001	0.00002	-0.00004
	Sisihan Piawai	0.00814	0.03522	0.01580	0.00640	0.00247	0.00126	0.00105
	RMS	0.00813	0.03520	0.01578	0.00639	0.00247	0.00126	0.00105
	Kurtosis	7.33260	4.98770	4.10460	3.39200	2.96770	2.74140	2.80680
	Pencongan	0.60750	0.05620	-0.14190	0.20670	-0.19000	-0.23290	-0.04550
Halaju (m/s)	Purata	-0.00030	0.00055	-0.00013	0.00027	-0.00004	0.00008	-0.00003
	Sisihan Piawai	0.00389	0.01740	0.01039	0.00473	0.00200	0.00143	0.00084
	RMS	0.00389	0.01739	0.00038	0.00472	0.00200	0.00143	0.00084
	Kurtosis	6.66110	3.49330	3.23390	5.59540	2.91140	3.12560	2.40120
	Pencongan	0.08300	0.00031	-0.01270	-0.22100	-0.04600	0.12980	-0.00490
Anjakan (m)	Purata	0.00024	-0.00014	0.00020	0.00012	-0.00004	0.00000	0.00003
	Sisihan Piawai	0.00075	0.00199	0.00143	0.00062	0.00038	0.00036	0.00018
	RMS	0.00074	0.00198	0.00143	0.00062	0.00038	0.00036	0.00018
	Kurtosis	2.14690	1.88270	4.01050	3.57480	2.18190	2.95160	2.11600
	Pencongan	0.00910	-0.02160	0.19840	-0.04900	0.30020	0.50300	0.30940

Pemerhatian pada carta radar bagi pecutan seperti ditunjukkan dalam Rajah 9(a) menunjukkan segmen 30% mencatatkan nilai purata, sisihan piawai dan RMS tertinggi diikuti pula dengan kurtosis dan pencongan yang tinggi dalam segmen 20%, menandakan keamatan gelombang paling tinggi dan tajam berlaku dalam tempoh awal gempa.

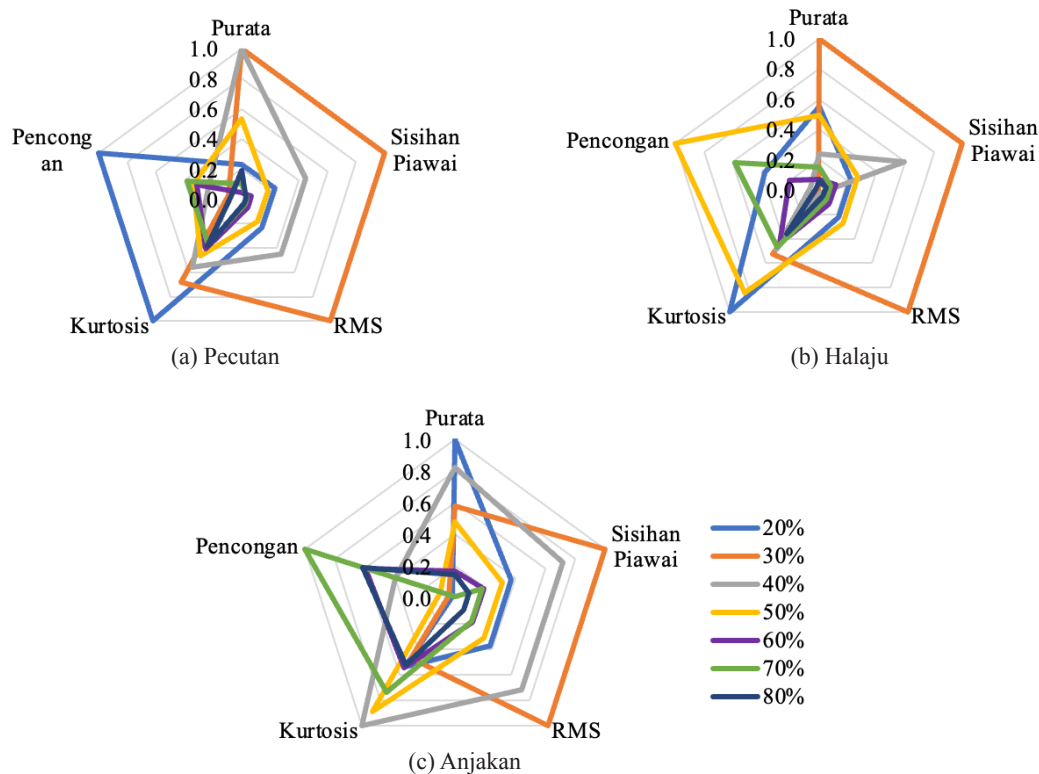
Nilai purata maksimum juga dapat diperhatikan pada segmen 40%. Hal ini menunjukkan pelepasan tenaga dalam bentuk gelombang yang sangat padat dan impulsif di awal permulaan gempa. Walau bagaimanapun nilai pencongan hampir sifar pada segmen 30% ini yang menunjukkan bentuk gelombang adalah hampir simetri di mana bentuk

gelombang tidak condong ke kiri atau ke kanan, sebaliknya hampir seimbang menggambarkan kestabilan dinamik dalam corak pecutan. Kestabilan dinamik merujuk kepada keadaan di mana gelombang pecutan tidak menunjukkan ketidakseimbangan mendadak yang boleh menandakan sistem atau struktur masih berada dalam julat tindak balas terkawal ketika segmen tersebut (Mousavi dan Beroza 2023). Secara keseluruhannya, dapatan ini mengesahkan bahawa segmen 30% adalah fasa kritikal pertama yang perlu diberi perhatian.

Hal yang sama juga diperhatikan pada carta radar halaju dalam Rajah 9(b) di mana segmen 30% juga mencatatkan nilai purata, sisihan piawai dan RMS tertinggi. Namun nilai kurtosis tertinggi dicatatkan dalam segmen 20% dan pencongan tertinggi pula pada segmen 50%. Corak ini menunjukkan bahawa tenaga kinetik tertinggi masih tertumpu dalam fasa awal, namun terdapat kemunculan gelombang sekunder atau aktiviti susulan dalam fasa pertengahan iaitu pada segmen 50%. Perkara ini selaras dengan fenomena redaman lambat akibat pengaruh jenis tanah dan pantulan dalaman gelombang seismik (Dong et al. 2022).

Carta radar anjakan dalam Rajah 9(c) menunjukkan ciri yang agak berbeza berbanding pecutan dan halaju. Hampir semua segmen menunjukkan peratusan tertinggi dengan parameter yang berbeza-beza. Sebagai contoh, pada

segment 20% purata menunjukkan nilai tertinggi, segmen 30% pula tertinggi untuk sisihan piawai dan RMS, segmen 40% mencatatkan nilai kurtosis tertinggi, manakala pencongan menunjukkan tertinggi pada 70%. Fenomena ini menandakan bahawa anjakan maksimum biasanya berlaku selepas fasa pelepasan tenaga utama, di mana tenaga kinetik yang dilepaskan terlebih dahulu melalui pecutan kemudian berubah menjadi pergerakan fizikal tanah. Pola ini selaras dengan kajian mengenai gerak tanah berimpuls di mana anjakan meningkat selepas puncak pecutan, serta pengamatan jangkamasa panjang dalam sistem struktur yang menunjukkan anjakan berlarutan selepas pelepasan tenaga awal (Yang et al. 2025). Nilai pencongan pula tertinggi pada segmen 70% di mana keadaan ini menunjukkan bentuk gelombang pada fasa penghujung isyarat pecutan adalah asimetri dengan pencongan ke arah positif. Dalam konteks isyarat seismik, ini menunjukkan bahawa pada fasa penghujung gempa, masih wujud getaran kecil yang bersifat lambat reda, mungkin disebabkan oleh pantulan gelombang dalam lapisan tanah yang tidak seragam, gempa susulan kecil yang berlaku hampir serentak dan redaman semula jadi yang tidak sempurna, menyebabkan tenaga masih dilepaskan secara beransur pada akhir tempoh isyarat (Wu et al. 2023).



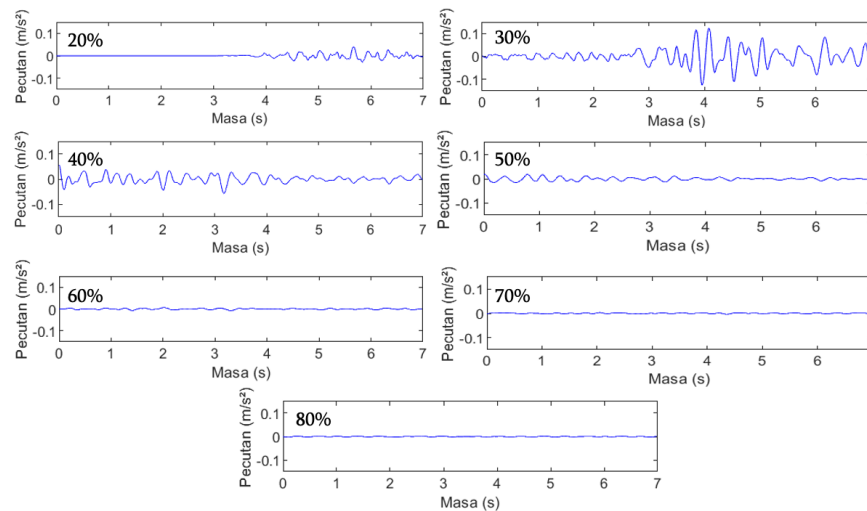
RAJAH 9. Carta radar nilai statistik dari siri isyarat masa diwakili (a) pecutan, (b) halaju, dan (c) anjakan dalam segmen 20% hingga 80%

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

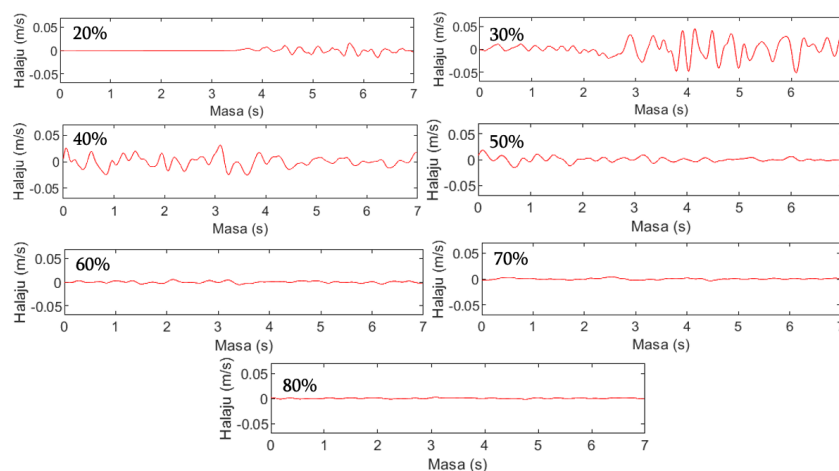
Rajah 10-12 berperanan sebagai visual pemotongan masing-masing siri isyarat masa bagi pecutan, halaju dan anjakan yang digunakan dalam analisis statistik. Ia menunjukkan bagaimana isyarat asal telah dibahagi kepada tujuh segmen masa berdasarkan peratusan dari keseluruhan panjang isyarat untuk tujuan pengekstrakan ciri-ciri statistik. Setiap segmen masa ditandakan secara berasingan sebagai 20% yang mewakili bahagian awal isyarat. Kemudian, 30%, 40% dan 50% bagi mewakili fasa pertengahan awal ke tengah isyarat dan 60%, 70% dan 80%, mewakili fasa penghujung isyarat. Hal ini membantu menekankan bahawa segmen ini terletak di awal fasa gelombang, dan oleh itu kewujudan tenaga maksimum dalam masa pendek adalah ketara. Bahagian segmen 60% hingga 80% menunjukkan penurunan tenaga. Bagi pecutan seperti dalam Rajah 10, segmen 30% telah dikenal pasti

sebagai mempunyai nilai maksimum serta sisihan piawai dan RMS yang tertinggi. Hal yang sama juga didapati pada parameter halaju dalam Rajah 11 yang mana segmen 30% mempunyai nilai halaju maksimum, begitu juga tertinggi pada nilai purata, sisihan piawai dan RMS.

Segmen-segmen 20% dan 30% menunjukkan peningkatan awal dalam anjakan, namun belum mencapai puncak utama. Segmen 60% - 80% memaparkan bentuk anjakan yang semakin mendatar, menandakan fasa akhir dan kestabilan semula tanah. Anjakan sangat penting dalam konteks ubahbentuk kekal yang boleh berlaku walaupun tenaga pecutan rendah. Rajah 12 ini menyumbang kepada pemahaman bila dan berapa banyak anjakan fizikal berlaku dalam tempoh masa gempa. Segmen 40% dikenal pasti sebagai fasa impak utama menunjukkan perubahan tetap permukaan bumi. Ia mengesahkan bahawa perbezaan dinamik temporal wujud bagi setiap parameter seismik.



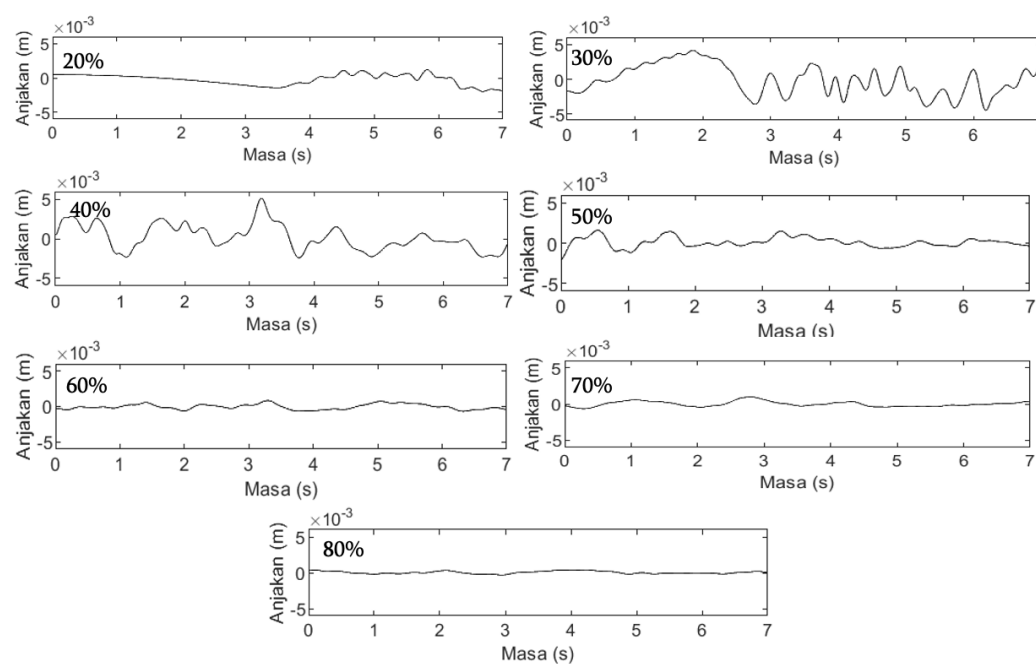
RAJAH 10. Peratusan segmen masa bagi siri isyarat pecutan pada segmen 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% dan 80%



RAJAH 11. Peratusan segmen masa bagi siri isyarat halaju pada segmen 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% dan 80%

Penjelmaan anak-gelombang berterusan (CWT) diaplikasikan ke atas isyarat pecutan untuk mengenal pasti tumpuan tenaga dan ciri dalam domain masa-frekuensi. Pecutan dalam peratusan 30% telah dianalisis dengan lebih teliti dari segi CWT, pemalar anak-gelombang dan tenaga seperti ditunjukkan dalam Rajah 13. Segmen dalam 30% dipilih kerana mengandungi tenaga tertinggi, dengan nilai maksimum pecutan, 0.124038 m/s^2 . Hasil kajian ini menghasilkan pemalar anak-gelombang yang menggambarkan kepekaan gelombang dalam kedua-dua domain masa dan frekuensi secara serentak. Ciri ini membolehkan analisis lebih terperinci berbanding

pendekatan konvensional seperti penjelmaan Fourier yang bersifat pegun (Jiang et al. 2024). Bagi segmen awal isyarat, terutamanya sekitar 3 – 6 saat, pemalar CWT menunjukkan nilai amplitud yang tinggi, menandakan kehadiran komponen frekuensi tinggi dan berintensiti besar. Corak padat dan tumpuan tenaga dalam julat masa ini mencerminkan pelepasan tenaga mendadak akibat gelombang-P dan permulaan gelombang utama (Yang et al. 2025). Ini juga disokong oleh nilai statistik sisihan piawai dan RMS tertinggi dalam segmen 30%, yang menandakan kekuatan gelombang secara seragam.



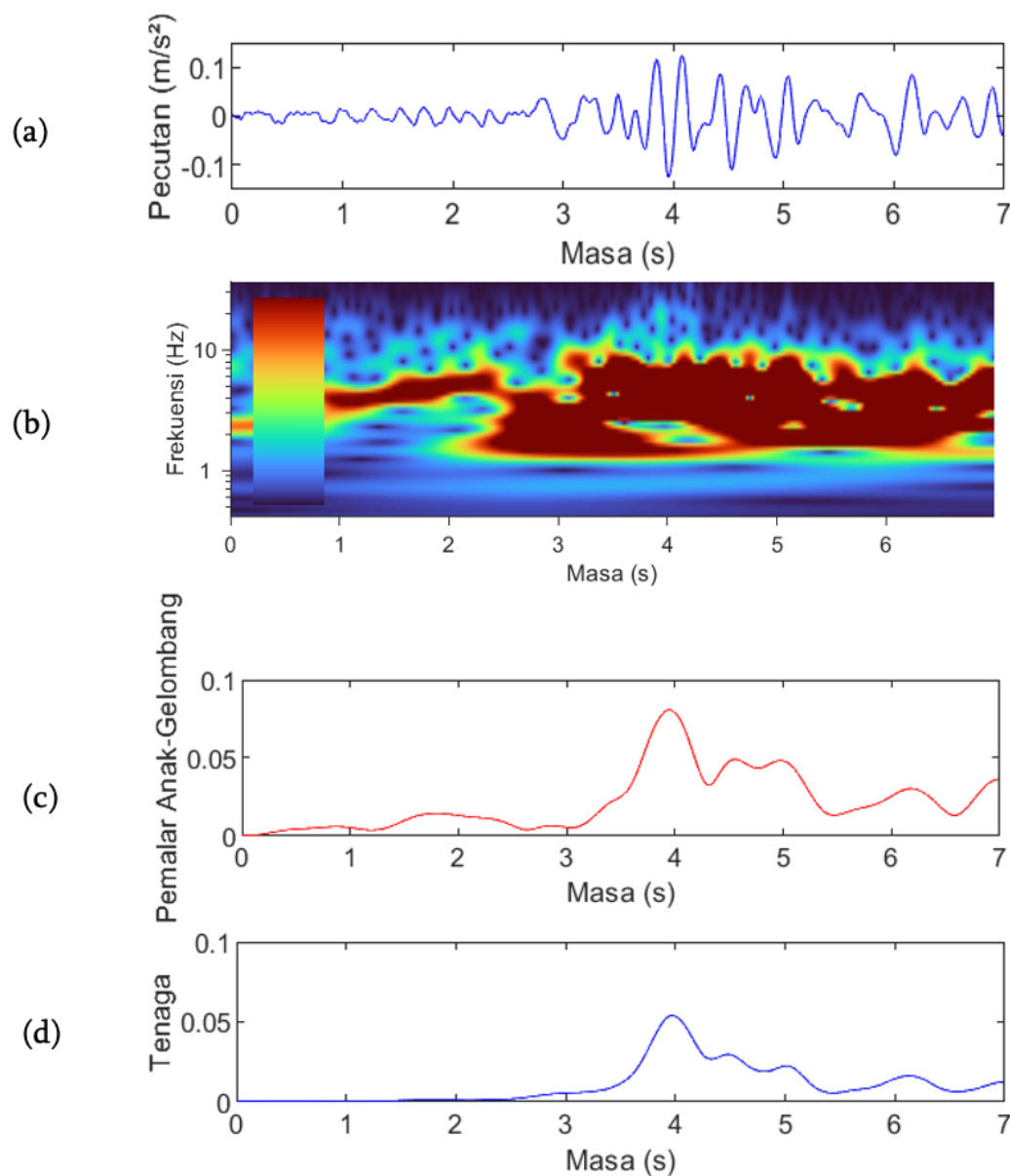
RAJAH 12. Peratusan segmen masa bagi siri isyarat anjakan pada segmen 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% dan 80%

Daripada aspek tenaga, spektrum anak-gelombang mendedahkan bahawa tenaga pecutan tertinggi terkandung dalam segmen 4 saat pertama isyarat. Pemalar anak-gelombang yang tinggi dalam julat masa ini menunjukkan bahawa tenaga yang dilepaskan berlaku dalam tempoh sangat singkat tetapi amplitud tinggi. Ciri ini amat penting dalam pembangunan sistem pengesanan awal, di mana gelombang-P boleh dikenal pasti melalui corak gelombang sebelum gelombang utama tiba. Secara keseluruhannya, penggunaan CWT dalam menganalisis siri isyarat pecutan memberikan pemahaman menyeluruh terhadap taburan tenaga seismik. Ia membuktikan bahawa bukan sahaja nilai puncak penting, tetapi lokasi sementara dan kandungan spektrum turut memainkan peranan dalam menilai kesan sebenar gempa terhadap struktur. Oleh itu, analisis CWT terhadap pecutan sangat penting dalam aplikasi kejuruteraan tahan gempa, sistem amaran awal serta pemodelan tingkah laku dinamik tanah.

Pendekatan dan analisis CWT yang diaplikasikan ke atas isyarat halaju mendedahkan corak dinamik getaran tanah yang lebih jelas dalam domain masa-frekuensi. Segmen 30% untuk halaju juga diteliti kerana mengandungi nilai tertinggi. Gambaran CWT, pemalar anak-gelombang dan tenaga adalah seperti ditunjukkan dalam Rajah 14. Pemalar anak-gelombang bagi halaju menunjukkan puncak amplitud paling menonjol iaitu pada sekitar 4 s, dengan nilai maksimum 0.0507350522 m/s . Tumpuan amplitud dalam julat ini menunjukkan bahawa tenaga kinetik tanah mencapai kemuncaknya dalam tempoh ini. Pemalar anak-gelombang di kawasan ini berkelompok rapat dan berbentuk tajam, yang mencerminkan pergerakan tanah pantas dan berskala besar akibat gelombang utama. Ini membawa maksud yang kaedah CWT terhadap halaju memperkuat hasil dapatan bahawa pergerakan pantas tanah berlaku dalam tempoh singkat selepas pelepasan tenaga utama (Yang et al. 2025).

Isyarat anjakan, yang diperoleh daripada integrasi dua kali terhadap pecutan, memberikan gambaran tentang jumlah anjakan tanah secara kumulatif akibat gelombang seismik. Corak analisis CWT terhadap anjakan menunjukkan profil pemalar yang lebih melengkung dan meluas, berbanding pecutan dan halaju, kerana proses integrasi yang menapis perubahan frekuensi tinggi. Pemalar anak-gelombang anjakan menunjukkan amplitud tertinggi dalam segmen 40% dengan nilai maksimum anjakan dicatatkan sebanyak 0.0050926746 m. Corak pemalar dalam segmen ini lebih lebar dan lambat, menandakan kesan tertangguh daripada gelombang utama.

Ini selaras dengan dapatan bahawa anjakan tidak mencapai puncak pada masa yang sama dengan pecutan atau halaju, tetapi berlaku selepasnya, hasil dari pengumpulan tenaga kinetik yang berterusan (Yang et al. 2025). CWT, pemalar anak-gelombang dan tenaga bagi penelitian dalam segmen 40% anjakan adalah seperti ditunjukkan dalam Rajah 15. Hasilnya, analisis secara CWT terhadap anjakan memainkan peranan penting dalam menilai risiko geoteknikal seperti tanah runtuh, pencecairan dan kegagalan asas struktur, serta menyediakan input berguna kepada simulasi pergerakan tanah dan reka bentuk sistem pemantauan jangka panjang (Solórzano et al. 2022).



RAJAH 13. Nilai puncak pecutan maksimum yang dicatatkan dalam segmen 30% (a) siri isyarat masa bagi pecutan, (b) skalogram, (c) pemalar anak-gelombang, (d) tenaga

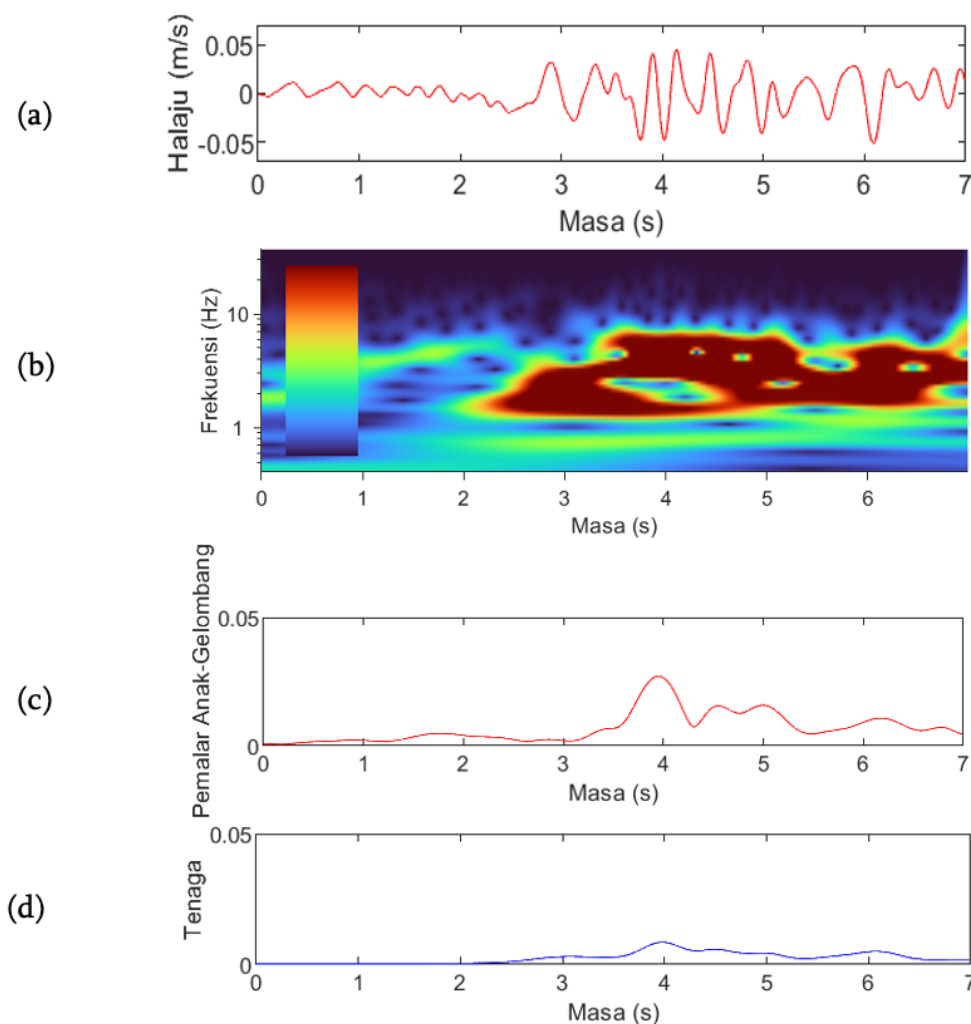
KESIMPULAN

Kajian ini telah membentangkan satu analisis terhadap isyarat masa gelombang seismik daripada gempa bumi Mw 6.0 di Ranau, Sabah (2015) menggunakan kaedah penjelmaan anak-gelombang berterusan (CWT). Fokus diberikan kepada tiga parameter utama iaitu pecutan, halaju dan anjakan yang dibahagikan kepada tujuh segmen masa (20% hingga 80%) untuk memahami pola tenaga dan dinamik gelombang dengan lebih terperinci.

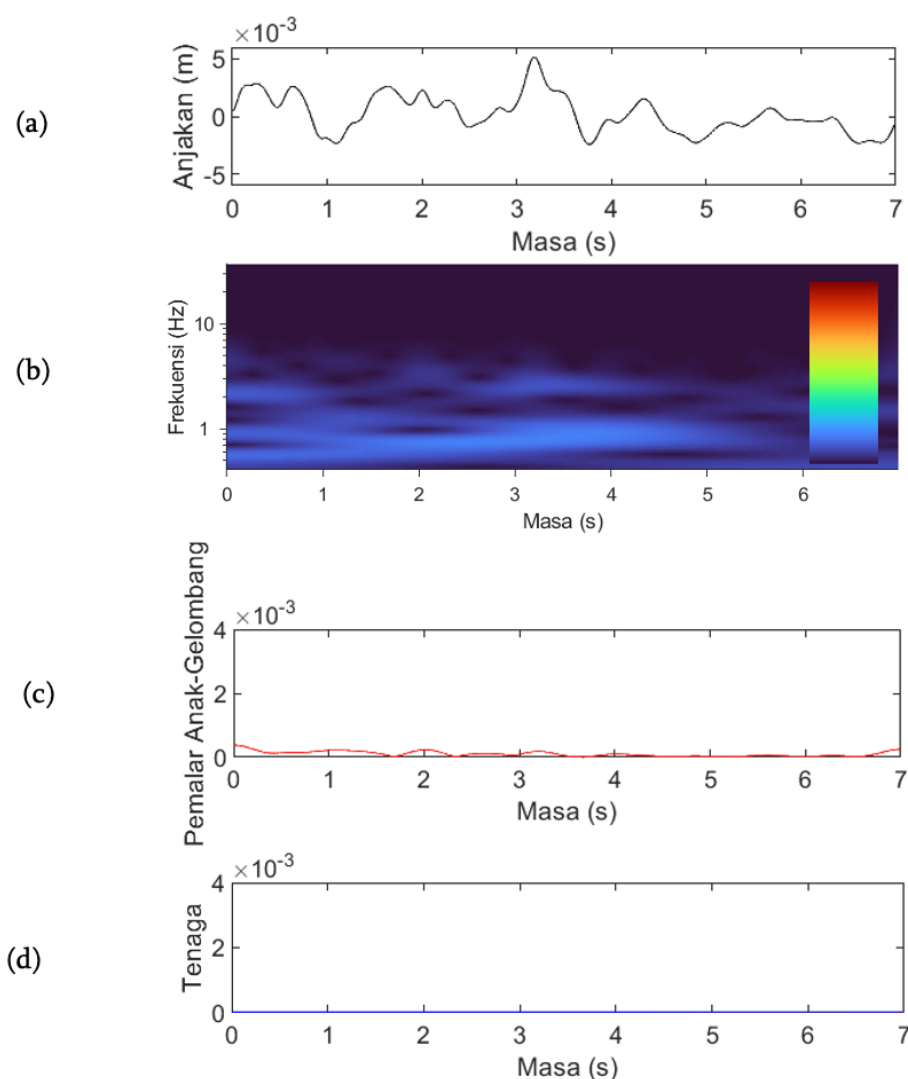
1. Dapatan utama menunjukkan bahawa segmen 30% awal merupakan fasa paling kritikal, dengan pecutan dan halaju masing-masing mencapai nilai puncak 0.124038 m/s^2 dan 0.0507350522 m/s . Segmen 40% pula mencatatkan anjakan maksimum 0.0050926746 m, menandakan

peralihan tanah yang ketara selepas pelepasan tenaga utama.

2. Analisis statistik memperkuat dapatan ini, di mana nilai sisihan piawai, RMS dan kurtosis tertinggi dalam segmen 30–40% mencerminkan kehadiran tenaga tinggi dan gelombang tajam. Pencongan yang hampir sifar menunjukkan bentuk gelombang yang simetri dan stabil.
3. Melalui pendekatan CWT, taburan pemalar anak-gelombang yang padat dalam segmen awal membuktikan tenaga utama dilepaskan dalam tempoh singkat dan berintensiti tinggi. Hal ini selari dengan potensi pengesanan awal gelombang-P. Pemalar anak-gelombang anjakan yang tinggi dalam segmen 40% mencerminkan pergerakan tanah yang berlarutan menandakan kesan tertangguh daripada gelombang utama, hal ini seterusnya penting dalam penilaian risiko kerosakan kekal.



RAJAH 14. Nilai puncak halaju maksimum yang dicatatkan dalam segmen 30% (a) siri isyarat masa bagi halaju, (b) skalogram, (c) pemalar anak-gelombang, (d) tenaga



RAJAH 15. Nilai puncak anjakan maksimum yang dicatatkan dalam segmen 40% (a) siri isyarat masa bagi anjakan, (b) skalogram, (c) pemalar anak-gelombang, (d) tenaga

Secara keseluruhannya, pendekatan berasaskan pembahagian masa dan CWT memberikan pemahaman yang mendalam terhadap kelakuan gelombang seismik. Kaedah ini berpotensi tinggi untuk diaplikasikan dalam sistem pemantauan awal gempa dan reka bentuk struktur tahan gempa. Kajian lanjutan boleh diperluas kepada lebih banyak lokasi stesen dan arah gelombang bagi meningkatkan kecekapan pemodelan seismik.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Malaysia Sabah (UMS) dan Universiti

Kebangsaan Malaysia (UKM) atas sokongan terhadap pelaksanaan kajian ini. Kajian ini telah dibiayai melalui Geran Penyelidikan UMS dengan kod GUG554/2-2022 dan GUG555/2-2022. Sumbangan daripada kedua-dua institusi ini amatlah dihargai dan telah memberikan impak besar dalam merealisasikan penyelidikan ini.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Abbas, Y.-B., Hossein, E., Naser, S. & Soroush, A. 2023. Machine learning prediction of wave characteristics: Comparison between semi-empirical approaches and DT model. *Ocean Engineering* 286(2).
- Abdiakhmetova, Z. & Temirbekova, Z. 2025. Integration of machine learning and wavelet algorithms for processing probing signals: An example of oil wells. *IEEE Access* 13: 92429–92444.
- Al-Hababi, T., Alkayem, N. F., Asteris, P. G., Wang, J., Hu, S. & Cao, M. 2023. Time-frequency domain methods for the identification of breathing cracks in beam-like structures. *Tribology International* 180.
- Dong, L., Song, D. & Liu, G. 2022. Seismic wave propagation characteristics and their effects on the dynamic response of layered rock sites. *Applied Sciences* 12(2): 758.
- Haddow, G. D., Bullock, J. A. & Coppola, D. P. 2020. *Introduction to Emergency Management*. 7th edition. Butterworth-Heinemann.
- Jiang, Y., Wang, X.-Y., Zhang, X.-L., Zhang, K. & Liu, J.-L. 2024. Instantaneous frequency identification for nonstationary signals of time-varying structures using enhanced synchroextracting wavelet transform and dynamic optimization. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 43(2): 617–633.
- Justice, A. P., Akimasa, Y., Ali, K. & Ayman, M. 2024. A machine learning approach combined with wavelet analysis for automatic detection of Pc5 geomagnetic pulsations observed at geostationary orbits. *Advances in Space Research* 74(12): 6277–6291.
- Kern, R., Tarek, A.-U., Vedran, S., Sarah, K., Maxim, K. & Manuel, S. n.d. Astro- and geoinformatics: Visually guided classification of time series data. In *Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation* 4: 267–282.
- Kubo, H., Naoi, M. & Kano, M. 2024. Recent advances in earthquake seismology using machine learning. *Earth, Planets and Space* 76: 36.
- Li, N., Narvekar, N., Raut, N., Sirkeci, B. & Gao, J. 2018. Seismic data classification using machine learning. *IEEE Fourth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService)*, 56–63.
- Li, X., Si, G., Shi, B., Cao, W., Cai, W., Oh, J. & Canbulat, I. 2024. Statistical properties of seismic foreshocks and aftershocks associated with longwall mining: Implications from the epidemic type aftershock sequence model. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 16(12): 4878–4894.
- Li, Z., Meier, M.-A., Hauksson, E., Zhan, Z. & Andrews, J. 2018. Machine learning seismic wave discrimination: Application to earthquake early warning. *Geophysical Research Letters* 45: 4773–4779.
- Mayolle, S., Roger, S., Stéphane, D. & Christopher, W. 2023. Normal fault damage zone growth in map view from analogue models. *Journal of Structural Geology* 176: 104975.
- Mohamad, I. I., Yunus, M. Z. M., Harith, N. S. H. & Pierino, L. W. 2019. Vulnerability assessment of buildings in Ranau township: Methodological design. *Jurnal Kejuruteraan* 2(1): 1–7.
- Mousavi, M. S. & Beroza, G. C. 2023. Machine learning in earthquake seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 51: 105–129.
- NEHRP. 2020. *National Earthquake Hazards Reduction Program Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*. Federal Emergency Management Agency (FEMA) I(1). Accessed on 16 July 2025.
- Senin, S. F., Khairullah, Y., Amer, Y. & Rohamezan, R. 2024. Machine learning application for concrete surface defects automatic damage classification. *Jurnal Kejuruteraan* 36(1): 21–27.
- Solórzano, J., Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Briones-Bitar, J. & Carrión-Mero, P. 2022. A systematic review of the relationship between geotechnics and disasters. *Sustainability* 14(19): 12835.
- Surucu, O., Stephen, A. G. & John, Y. 2023. Condition monitoring using machine learning: A review of theory, applications, and recent advances. *Expert Systems with Applications* 221.
- Teddy, L. & Hardiman, G. 2018. The soft story challenge to architectural design in earthquake-prone areas. *Jurnal Kejuruteraan* 30(2): 141–151.
- Torabi, A., Ellingsen, T. S. S., Johannessen, M. U., Alaei, B., Rotevatn, A. & Chiarella, D. 2020. Fault zone architecture and its scaling laws: Where does the damage zone start and stop? *Geological Society, London, Special Publications* 496(1).
- Usmani, U. A., Izzatdin, A. A., Jafreezal, J. & Junzo, W. 2024. Deep learning for anomaly detection in time-series data: An analysis of techniques, review of applications, and guidelines for future research. *IEEE Access* 12: 174564–174590.
- Wu, H., Zhou, Y., Qian, Y., Yang, F., Yu, G., Wu, G. & Zhang, Y. 2023. Seismic-wave path attenuation and local site responses in eastern Guangdong province revealed by the ground-motion spectral analyses. *Frontiers in Earth Science* 11: 1091785.
- Yan, B. 2024. Data analysis methods and signal processing techniques in gravitational wave detection. *Journal of Applied Mathematics and Physics* 12: 3774–3783.
- Yang, F., Xin, C., Wang, Z., Yu, X., Feng, W. & Hu, Y. 2025. Investigating deformation and failure mechanisms of discontinuous anti-dip bench rock slopes through shaking table tests and numerical simulations. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 58: 5329–5361.

- Yılmaz, N. & Akıllı, M. 2025. Weak periodic signal identification in low amplitude seismic waves based on chaotic oscillator. *Journal of Physics: Complexity* 6.
- Yin, X., Liu, F., Cai, R., Yang, X., Zhang, X., Ning, M. & Shen, S. 2022. Research on seismic signal analysis based on machine learning. *Applied Sciences* 12(16): 8389.
- Zulhamidi, N. F. I., Abdullah, M., Hamid, N. S. A. & Yusof, K. A. 2023. Comparative analysis of variants of geomagnetic diurnal variation ratio method for earthquake precursor detection. *Jurnal Kejuruteraan* 35(4): 881–888.